

Gabriel Ceolla

ESTUDO DO CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES ELÉTRICOS CLÁSSICOS

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Renato Lucas
Pacheco, Dr.

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ceolla, Gabriel

Estudo do controle de velocidade de motores
elétricos clássicos / Gabriel Ceolla ; orientador,
Renato Lucas Pacheco, 2019.

71 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

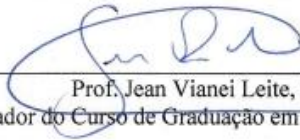
1. Engenharia Elétrica. 2. Motores Elétricos. 3.
Controle de Velocidade. 4. Inversores de
Frequência. I. Pacheco, Renato Lucas . II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

Gabriel Ceolla

ESTUDO DO CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES ELÉTRICOS CLÁSSICOS

Este trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em
sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 06 de fevereiro de 2019.



Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Hans Helmut Zürn, PhD.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a todos que, de alguma forma, me ajudaram nessa jornada e, em especial, aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que fizeram parte dessa etapa da minha vida. Aos meus colegas de curso, pela amizade e pelo companheirismo. Aos meus amigos de Caçador que, apesar da distância, sempre estiveram presentes, mesmo que virtualmente. E minha família, que sempre me deu força nessa jornada.

Meus pais, Helson Ceolla e Lindamir Sicka Ceolla, que tiveram um papel fundamental na minha formação, sempre me ofereceram todo o suporte necessário nessa jornada. Agradeço imensamente a vocês, pelos conselhos e ensinamentos que me guiarão por toda minha vida pessoal e profissional.

Ao meu irmão, Alysson, pelo grande exemplo, por seu companheirismo, pelo apoio e presença. À minha cunhada, Priscylla, por sua amizade e disposição em ajudar.

Ao meu orientador deste trabalho, Renato Lucas Pacheco, pelo conhecimento transmitido, por sua compreensão e pelas conversas. Agradeço também aos demais bons professores que tive durante a graduação, os quais, além de terem o dom de transmitir o conhecimento, também proporcionaram boas conversas, com críticas e conselhos.

Aos amigos que o curso de Engenharia Elétrica me deu, e que sempre estiveram presentes nos bons e maus momentos, seria uma honra para mim estender a amizade de vocês para a vida inteira.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo reunir e analisar os principais tipos de motores elétricos, bem como as formas de se controlar a velocidade dessas máquinas. Essa análise será feita com base no tipo de motor em questão, na facilidade em realizar o controle de velocidade e no tipo de carga que esse motor irá alimentar, levando em conta a relação de torque e velocidade da carga em questão. Primeiramente será feita uma revisão bibliográfica sobre os princípios de funcionamento desses motores. Em seguida, serão apresentadas as formas de se controlar a velocidade de rotação desses equipamentos. Para apresentar as formas de controle dessas máquinas, primeiramente será feita uma explicação teórica sobre as formas de como a velocidade pode ser controlada e, em seguida, os equipamentos utilizados nesse processo, bem como suas formas de funcionamento. Por último, será feito um comparativo desses dispositivos, concluindo qual é mais adequado para diferentes tipos de cargas.

Palavras-chave: Motores elétricos. Controle de velocidade. Inversores de frequência.

ABSTRACT

This work aims to gather and analyze the main types of electric motors as well as ways to control the speed of these machines. This analysis will be done based on the type of engine presented, the ease in performing the speed control and the type of load that this engine will feed, taking in consideration the torque and speed ratio of the load in question. Firstly, a bibliographic review will be done on the principles of operation of these engines. Also, will be presented the ways to control the speed of rotation of these equipment. In order to present the forms of control of these machines, a theoretical explanation will first be made about the ways in which the speed can be controlled, and then the equipment used in this process, as well as its forms of operation. Finally, a comparison of these devices will be made, concluding which is more suitable for different types of loads.

Keywords: Electric motors. Speed control. Frequency inverters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aspectos construtivos de uma máquina CC	24
Figura 2 - Máquina CC elementar.....	26
Figura 3 - Tensão induzida na espira.....	28
Figura 4 - Máquina CC elementar com comutador	29
Figura 5 - Máquina CC elementar com alimentação.....	30
Figura 6 - Ligação de um motor CC com excitação independente	35
Figura 7 - Curva rotação <i>versus</i> torque de um motor CC com excitação independente	35
Figura 8 - Ligação de um motor CC com excitação em série	36
Figura 9 - Curva rotação <i>versus</i> torque de um motor CC série	37
Figura 10 - Ligação de um motor CC com excitação em derivação	38
Figura 11 - Curva rotação <i>versus</i> torque de um motor CC em derivação	38
Figura 12 - Curva rotação <i>versus</i> torque de um motor CC em derivação	40
Figura 13 - Campo girante resultante, em três instantes de tempo distintos	40
Figura 14 - Estator de um motor síncrono trifásico.....	42
Figura 15 - Característica conjugado <i>versus</i> ângulo de um motor síncrono	43
Figura 16 - Rotor bobinado de um motor de indução	45
Figura 17 - Corte de um motor de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo	45
Figura 18 - Princípio de funcionamento do motor de indução	46
Figura 19 - Curvas para um motor assíncrono	49
Figura 20 - Controle de velocidade do motor CC com excitação independente	52
Figura 21 - Controle de velocidade de um motor CC com excitação em série	52
Figura 22 - Controle de velocidade de um motor com excitação em derivação	53
Figura 23 - Circuito equivalente do motor de indução.....	55
Figura 24 - Curvas conjugado <i>versus</i> velocidade para diversos valores de resistência rotórica.....	56
Figura 25 - Variação de tensão e frequência no controle escalar	58
Figura 26 - Reação torque <i>versus</i> frequência no controle escalar	59
Figura 27 - Controle escalar para baixas frequências.....	59
Figura 28 - Correntes de magnetização e produtora de torque em um motor assíncrono	60

Figura 29 - Controle de velocidade de um motor síncrono com um inversor	62
Figura 30 – Tipos de carga.....	65
Figura 31 – Seleções de um motor síncrono para uma carga constante	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC – Corrente Contínua
CA – Corrente Alternada

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
e	Tensão induzida em um segmento de espira	V
v	Velocidade	m/s
B	Densidade de fluxo magnético	Wb/m ²
l	Comprimento	m
F	Força	N
τ	Torque induzido em um segmento de espira	N.m
A	Área	m ²
Φ	Fluxo magnético	Wb
ω	Velocidade angular	rad/s
n	Velocidade angular	Rpm
T	Torque induzido	N.m
I	Corrente elétrica	A
E	Tensão induzida	V
V	Tensão terminal	V
R	Resistência	Ω
FMM	Força magnetomotriz	Ae
f	Frequência	Hz
δ	Ângulo de carga	°
P	Potência	W

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS GERAIS	22
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
1.3	ESTRUTURA DO TEXTO	22
2	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	23
2.1	MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA	23
2.1.1	Motor CC com excitação independente	34
2.1.2	Motor CC com excitação em série	36
2.1.3	Motor CC com excitação em derivação.....	37
2.2	MÁQUINAS DE CORRENTE ALTERNADA.....	39
2.2.1	O campo girante.....	39
2.2.2	Máquinas síncronas	41
2.2.3	Máquinas assíncronas.....	43
3	CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES ELÉTRICOS	51
3.1	CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES CC.....	51
3.1.1	Motor CC com excitação independente	51
3.1.2	Motor CC com excitação em série	52
3.1.3	Motor CC com excitação em derivação.....	53
3.2	CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES CA...	54
3.2.1	Motor de indução	54
3.2.1.1	Controle por variação da resistência rotórica.....	54
3.2.1.2	Controle por variação da frequência	57
3.2.1.2.1	<i>Controle escalar.....</i>	<i>57</i>
3.2.1.2.2	<i>Controle vetorial.....</i>	<i>60</i>
3.2.2	Motor síncrono	61
4	SELEÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS.....	65
4.1	CARGAS HIPERBÓLICAS	66
4.2	CARGAS CONSTANTES.....	67

4.3	CARGAS LINEARES	67
4.4	CARGAS PARABÓLICAS	68
5	CONCLUSÃO.....	69
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

Uma máquina elétrica é um dispositivo que pode converter tanto a energia mecânica em energia elétrica, como a energia elétrica em energia mecânica. Quando é usada para converter energia mecânica em energia elétrica, ela é chamada de gerador. Quando faz o inverso, ou seja, converte energia elétrica em energia mecânica, ela é denominada motor (CHAPMAN, 2013).

As máquinas elétricas podem ser basicamente divididas em duas classes: máquinas de corrente contínua e máquinas de corrente alternada. Esses dispositivos possuem princípios de funcionamento que, para se chegar ao objetivo deste trabalho, serão explicados nas seções a seguir.

Em muitas aplicações, os motores elétricos requerem controle de velocidade e conjugado. A maioria das máquinas CA do século passado tendia a ser empregada basicamente como dispositivos de velocidade única (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014).

Normalmente, elas funcionavam com fontes de frequência fixa, ao passo que o controle da velocidade requeria uma fonte de velocidade variável. Assim, as aplicações que exigiam velocidade variável e conjugado controlado eram atendidas por máquinas CC, que podem proporcionar controle de velocidade altamente flexível, embora a certo custo, porque elas são mais complexas, mais caras e necessitam de mais manutenção do que as máquinas CA (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014).

As máquinas de corrente alternada vêm ganhando bastante espaço nas indústrias, por sua versatilidade, baixo custo e constante evolução dos principais dispositivos de controle dessas máquinas, notadamente, o inversor de frequência. A evolução da eletrônica de potência e dos semicondutores possibilitou um salto na alimentação desses motores, que cada vez mais vem evoluindo.

Já os motores CC são conhecidos por terem um custo mais elevado em relação aos motores CA, porém com alto desempenho de controle e regulação que. Apesar de terem sofrido pouca evolução no decorrer do tempo, eles ainda possuem uma boa empregabilidade.

Pela grande e variada indústria existente atualmente, e variedade de motores disponíveis no mercado, é necessário avaliar qual máquina é mais adequada para cada situação, avaliando fatores como custo, desempenho e precisão.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo do funcionamento dos principais tipos de motores elétricos, bem como a forma de como controlar suas velocidades.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo específico deste trabalho é, a partir do estudo feito sobre os motores elétricos clássicos (motores de corrente contínua, motores síncronos e motores assíncronos trifásicos), apresentar seus modelos elétricos e fazer um comparativo teórico sobre os tipos estudados, definindo qual tipo de motor e respectivo controle de velocidade é mais adequado para diferentes tipos de cargas.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

O texto deste trabalho é dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo faz uma introdução do tema trabalhado, bem como da importância do controle de motores elétricos.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre o princípio de funcionamento dos motores estudados, sendo eles: motor CC, motor de indução e motor síncrono.

O capítulo 3 faz uma abordagem, com base no princípio de funcionamento de cada tipo de motor, sobre como controlar a velocidade dessas máquinas.

No capítulo 4 é feita uma aplicação do tema estudado, comparando o que foi apresentado e, de acordo com cada situação prática, é apresentada uma possível solução de seleção do tipo de motor elétrico, para o tipo específico de carga.

Por fim, no capítulo 5, é feita uma conclusão sobre o que foi abordado no trabalho e também é comentada a possibilidade de futuros trabalhos sobre o tema.

2 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

2.1 MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA

Segundo Chapman (2013), as máquinas de corrente contínua (CC) são motores, que convertem a energia elétrica CC em energia mecânica, e geradores, que convertem a energia mecânica em energia elétrica CC. Apesar de serem chamadas de máquinas de corrente contínua, elas possuem correntes e tensões alternadas em seu interior, necessitando de um mecanismo denominado comutador, para que produzam torque estável em seus eixos, no caso de motor, ou tensão contínua em seus terminais, no caso de gerador.

As máquinas de corrente contínua são caracterizadas por sua versatilidade, podendo ser projetadas para desempenhar uma grande variedade de características de velocidade de rotação e torque, em regime dinâmico ou permanente, através das possibilidades de ligação do enrolamento de excitação e armadura. As máquinas CC são frequentemente aplicadas, por exemplo, em situações onde é necessário um controle preciso de desempenho, com uma certa variação de velocidade.

Segundo Pacheco (2010), máquina de corrente contínua é uma máquina elétrica de dupla excitação, onde o enrolamento de campo está localizado no estator e o enrolamento de armadura no rotor (parte girante).

O estator da máquina CC é formado por (WEG, 2007):

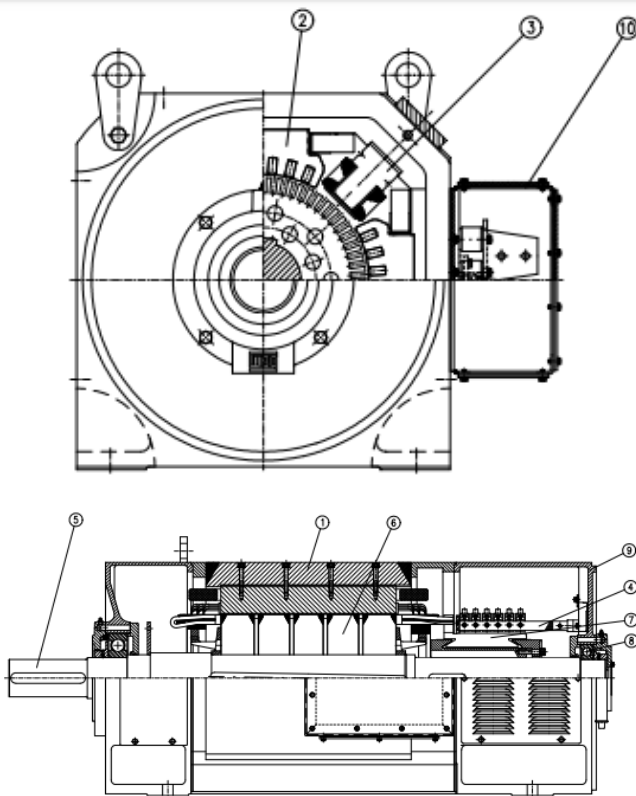
- Carcaça: Tem função estrutural do mecanismo e também a finalidade de conduzir o fluxo magnético
- Polos de excitação: São constituídos por enrolamentos de condutores sobre núcleos feitos de material ferromagnético.
- Polos de comutação: Estão localizados na região interpolar e são percorridos pela corrente de armadura. Tem como finalidade amenizar o efeito de reação de armadura e reduzir o efeito de centelhamento.
- Enrolamento de compensação: É um enrolamento distribuído na periferia da sapata polar e tem a função de diminuir o efeito de reação de armadura.
- Conjunto porta escovas e escovas: Permitem a comunicação com o comutador. As escovas deslizam sobre os contatos do comutador, estabelecendo assim a conexão elétrica com esse componente do rotor.

O rotor é composto por (WEG, 2007):

- Rotor com enrolamento: Centrado no interior da carcaça e acomoda o enrolamento de armadura e faz a conexão elétrica com as lâminas do comutador.
- Comutador: É o conversor mecânico que transfere a energia ao enrolamento do rotor.
- Eixo: É o elemento que transfere a potência mecânica desenvolvida pelo motor.

A figura 1 ilustra a estrutura e os componentes da máquina CC.

Figura 1 – Aspectos construtivos de uma máquina CC



Fonte: (WEG, 2007)

Na citada figura, tem-se:

1. Coroa.
2. Polo de excitação com enrolamento.
3. Polo de comutação com enrolamento.
4. Portas escova.
5. Eixo.
6. Pacote de chapas do rotor com enrolamento.
7. Comutador.
8. Rolamentos.
9. Mancal.
10. Caixa de ligações.

Para se entender o princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua, usa-se um dos exemplos mais simples de máquina rotativa CC. Este modelo, representado na figura 2, consiste em uma única espira condutora, colocada em uma ranhura de um núcleo ferromagnético, girando em torno de um eixo fixo e percorrido por um fluxo magnético. A espira girante é relacionada ao rotor da máquina e a parte estática é denominada estator.

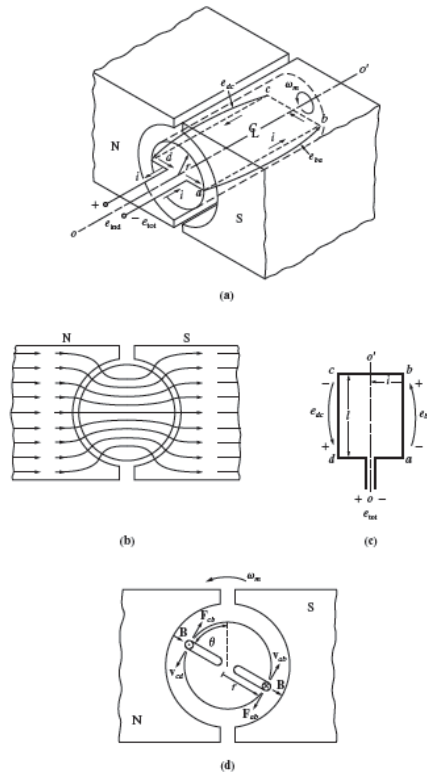
Segundo Chapman, se o rotor começar a girar, uma tensão será induzida na espira. A espira de fio é retangular, com os lados *ab*, *bc*, *cd* e *da*. Nessa modelagem, conforme ilustrado na figura 3(b), o campo magnético é constante e perpendicular à superfície do rotor em todos os pontos abaixo das faces polares e rapidamente cai a zero além das bordas dos polos. Para se determinar a tensão total induzida e_{tot} na espira, será examinado cada segmento da espira, onde a tensão induzida é dada pela equação 1:

$$e = (v \times B) \cdot l \quad (1)$$

onde:

- v é a velocidade tangencial de rotação.
- B é a densidade de fluxo magnético, ou indução magnética.
- l é o comprimento.

Figura 2 – Máquina CC elementar



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Assim, tem-se:

1. Segmento ab . Nesse segmento, a velocidade é tangencial ao círculo descrito pela rotação. Como pode ser observado na figura 2(d), a velocidade v_{ab} é perpendicular com o vetor indução magnética B e o produto vetorial $v_{ab} \times B$, primeiro termo da equação 1, aponta para dentro da página. Portanto, a tensão induzida no segmento ab , abaixo da face do polo da máquina, sendo que a velocidade v_{ab} é a própria velocidade tangencial v da máquina, vale:

$$e_{ab} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (2)$$

Ou, em módulo:

$$e_{ab} = v B l \quad (3)$$

2. Segmento bc . Nesse caso, o produto vetorial $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ também é perpendicular ao plano da página, porém, como o resultado desse produto é perpendicular ao vetor \mathbf{l} , o produto escalar resultante será zero. Portanto a tensão induzida nesse segmento será zero:

$$e_{bc} = 0 \quad (4)$$

3. Segmento cd . Analogamente ao segmento ab , a velocidade nessa parte da espira é tangencial à trajetória de rotação. Porém, nesse caso, o produto vetorial $\mathbf{v}_{cd} \times \mathbf{B}$ aponta para fora da página. Portanto, a tensão induzida no segmento cd vale:

$$e_{cd} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (5)$$

Ou, em módulo:

$$e_{cd} = v B l \quad (6)$$

4. Segmento da . Como no segmento bc , o produto $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ é perpendicular a \mathbf{l} . Portanto, a tensão nesse segmento também será zero:

$$e_{dc} = 0 \quad (7)$$

Com as tensões em cada setor, e também observando a figura 2(c), pode-se calcular, conforme mostra a equação 8, a tensão total induzida na espira.

$$e_{tot} = e_{ab} + e_{bc} + e_{cd} + e_{da} \quad (8)$$

Substituindo-se os valores:

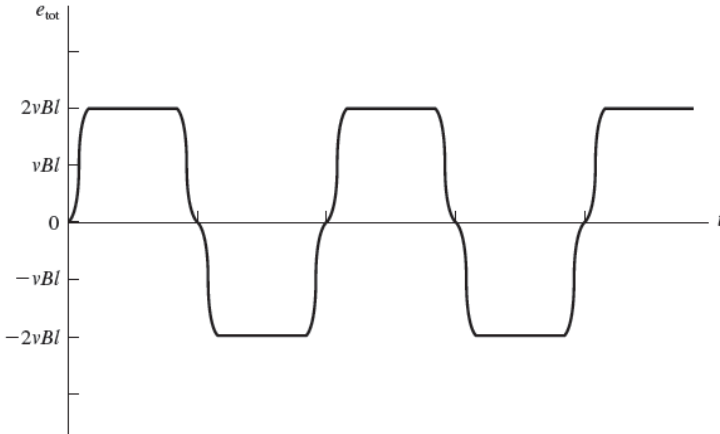
$$e_{tot} = v Bl + 0 + v Bl + 0 \quad (9)$$

Portanto:

$$e_{tot} = 2v Bl \quad (10)$$

Como, a cada meio período de rotação da espira, os segmentos *ab* e *cd* trocam de polo, e, conseqüentemente, o produto vetorial $v \times B$ inverte o sentido, a tensão induzida na espira troca de polaridade e toma a forma, ao longo do tempo, conforme ilustrado na figura 3:

Figura 3 – Tensão induzida na espira



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Como pode ser observado na figura 3, a tensão induzida na saída da espira é uma tensão com valores positivos e negativos, sendo assim uma tensão alternada. Como a máquina em questão é uma máquina de corrente contínua, para que essa tensão se torne, de fato, aproximadamente contínua, usa-se um dispositivo chamado comutador.

Como mostra a figura 4, dois condutores semicirculares são colocados na extremidade da espira de modo que, a cada vez que a tensão mudar de polaridade na espira, contatos trocam de segmentos. Desse modo, haverá sempre uma saída com a mesma polaridade nos segmentos semicirculares. Segundo Chapman, os segmentos semicirculares rotativos são chamados de segmentos comutadores, ou anel comutador, e os contatos fixos são denominados escovas.

Para a determinação do conjugado induzido na espira, observa-se a figura 5, onde uma bateria foi conectada à máquina. A forma de se obter o conjugado sobre a espira é análoga à abordagem utilizada para se determinar a tensão induzida na espira, ou seja, por segmentos. A equação que determina a força que atua sobre um segmento de espira, quando se encontram abaixo das faces dos polos, é a seguinte:

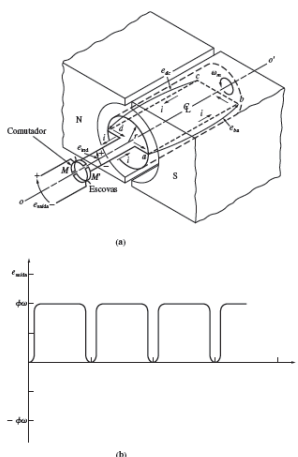
$$F = i(l \times B) \quad (11)$$

E o torque sobre o segmento é:

$$\tau = rF \sin \theta \quad (12)$$

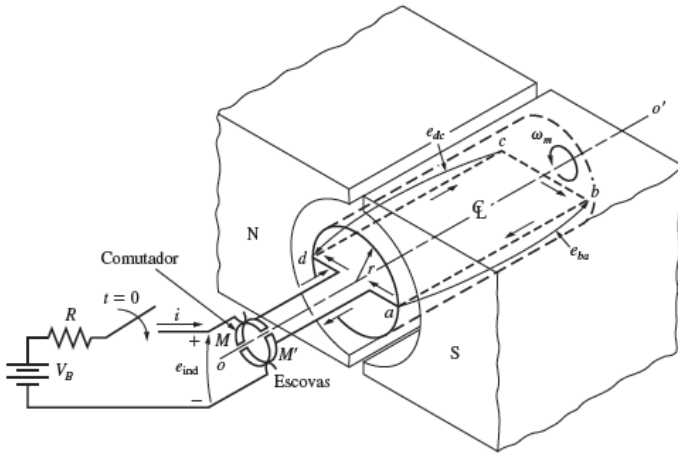
onde θ é o ângulo entre F e r .

Figura 4 – Máquina CC elementar com comutador

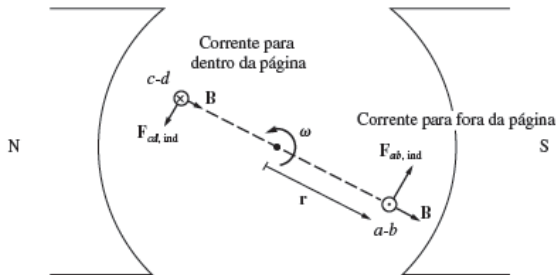


Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Figura 5 – Máquina CC elementar com alimentação



(a)



(b)

Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Quando a espira está abaixo das faces dos polos, o conjugado pode ser assim calculado (CHAPMAN, 2013):

1. Segmento *ab*. Nesse segmento, o sentido da corrente é para fora do plano na página. O campo magnético está apontando radialmente para fora do rotor. Portanto, a força sobre o segmento é dada por:

$$F_{ab} = i(l \times B) \quad (13)$$

Ou em módulo, tangente ao sentido de rotação da espira:

$$F_{ab} = ilB \quad (14)$$

Então, conforme a equação 12, o torque sobre o segmento vale:

$$\tau_{ab} = rF_{ab}\text{sen}90^\circ = rilB \quad (15)$$

2. Segmento *bc*. Na posição em que a espira se encontra na figura 5(a), como os vetores *l* e *B* são paralelos, o produto vetorial ($l \times B$) é nulo. Portanto, a força e o torque sobre esse segmento é nulo:

$$F_{bc} = \tau_{bc} = 0 \quad (16)$$

3. Segmento *cd*. Analogamente ao segmento *ab*, porém com o sentido da corrente inverso e o campo magnético apontando para dentro do rotor. A força e o conjugado sobre esse segmento terão os mesmos módulos, e também com tangente ao sentido de rotação:

$$F_{cd} = ilB \quad (17)$$

$$\tau_{cd} = rF_{cd}\text{sen}90^\circ = rilB \quad (18)$$

4. Segmento *da*. Conforme no segmento *bc*, porém com o sentido da corrente invertido. A força e o torque também são nulos nesse segmento:

$$F_{da} = \tau_{da} = 0 \quad (19)$$

Portando, o conjugado total sobre a espira será:

$$\tau_{tot} = \tau_{ab} + \tau_{bc} + \tau_{cd} + \tau_{da} = rilB + 0 + rilB + 0 = 2rilB \quad (20)$$

Utilizando uma aproximação da área da superfície do polo da máquina, pode-se chegar a uma equação alternativa do torque. Como pode ser visto na figura 5, a área do rotor pode ser expressa por:

$$A_r = 2\pi rl \quad (21)$$

E, como a área de cada polo, nesse caso, é aproximadamente a metade da área do rotor, chega-se à seguinte expressão:

$$A_p \approx \pi rl \quad (22)$$

Utilizando esse fato, e também que $\Phi = A_p B$, onde Φ é o fluxo magnético que percorre toda a área de rotação da espira. Chega-se na seguinte equação alternativa do torque:

$$\tau_{tot} = \frac{2}{\pi} \Phi i \quad (23)$$

Assim, o conjugado produzido na máquina é o produto do fluxo presente no interior da máquina com a corrente na máquina, multiplicado por uma constante que representa os aspectos construtivos mecânicos da máquina (a porcentagem do rotor que está coberta pelas faces dos polos). Em geral, a tensão de qualquer máquina real dependerá dos mesmos três fatores (CHAPMAN, 2013, p. 413):

1. O fluxo da máquina.
2. A corrente na máquina.
3. Uma constante que representa a construção da máquina.

A partir dessa aproximação, e como $v = r\omega_m$ pode-se também modificar a equação 10, que representa a tensão total induzida na espira, chegando-se à equação 24.

$$e_{tot} = \frac{2}{\pi} \Phi \omega_m \quad (24)$$

onde ω_m é a velocidade angular da máquina, em radianos por segundo.

Para uma abordagem mais prática da máquina de corrente contínua, é necessário modificar as equações definidas anteriormente para se chegar nas equações de uma máquina real. Seja Z o número de condutores abaixo dos polos da máquina, lembrando que cada espira contém dois condutores, e a número de caminhos que essa corrente pode percorrer. A equação da tensão total induzida no rotor da máquina, segundo Chapman (2013), pode ser expressa como:

$$E = \frac{ZvBl}{a} \quad (25)$$

Para uma máquina de P pares de polos, a área A_p por polo será:

$$A_p \approx \frac{2\pi rl}{P} \quad (26)$$

Então, o fluxo total por polo, lembrando que o fluxo equivale à densidade de fluxo B multiplicada pela área de um polo da máquina, vale:

$$\Phi = \frac{2\pi rl}{P} B \quad (27)$$

Substituindo B na equação 25, a tensão interna gerada na máquina será :

$$E = \frac{ZP}{2\pi ra} v \Phi \quad (28)$$

Lembrando que $v = r\omega_m$, chega-se à seguinte expressão:

$$E = \frac{ZP}{2\pi a} \Phi \omega_m = K \Phi \omega_m \quad (29)$$

Como a unidade de velocidade mais usual na prática é rotações por minuto (RPM) e sabendo que $\omega_m = \frac{2\pi}{60} n_m$, onde n_m é a rotação do motor em RPM, a tensão induzida pode ser expressa da seguinte forma:

$$E = \frac{Zp}{60a} \Phi \omega_m = K' \Phi n_m \quad (30)$$

onde K' é uma constante com as características construtivas da máquina.

Para se chegar à equação do conjugado em uma máquina de corrente contínua, utiliza-se o mesmo método usado para se chegar à equação de tensão induzida, então:

$$T = K \Phi i_a \quad (31)$$

em que $K = \frac{ZP}{2\pi a}$, Φ é o fluxo por polo e I_a é a corrente de armadura da máquina.

Devido às diferentes formas de se ligar o enrolamento de campo e o enrolamento de armadura (rotor), o motor de corrente contínua oferece várias possibilidades de curvas de torque *versus* rotação, que apresentam diferentes características. A seguir serão apresentadas algumas dessas possibilidades.

2.1.1 Motor CC com excitação independente

Nesse modo de ligação, o enrolamento de campo e de armadura são alimentados independentemente, como pode ser observado na figura 6, que ilustra o circuito desse esquema de ligação.

Analisando a figura 6, pode-se concluir que a equação da armadura, pela equação da Lei de Kirchhoff das tensões, equivale a:

$$V - E = R_a i_a \quad (32)$$

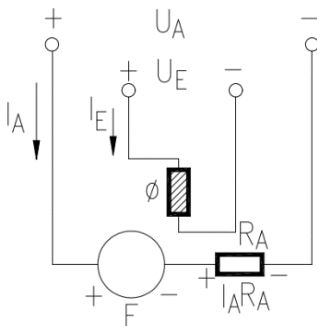
E, substituindo-se o valor de E , de acordo com a equação 29, tem-se:

$$V - K \Phi \omega_m = R_a i_a \quad (33)$$

E, portanto:

$$\frac{V - R_a i_a}{K\Phi} = \omega_m \quad (34)$$

Figura 6 – Ligação de um motor CC com excitação independente



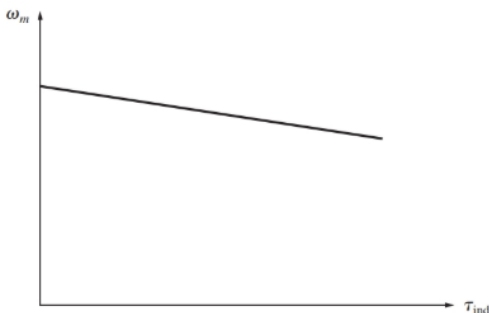
Fonte: (WEG, 2007)

Com a equação 31, pode-se modificar a equação 34, que tomará a seguinte forma:

$$\omega_m = \frac{V}{K\Phi} - \frac{R_a i_a T}{K\Phi K\Phi i_a} = \frac{V}{K\Phi} - \frac{R_a T}{(K\Phi)^2} \quad (35)$$

E, de acordo com a equação à cima, a relação velocidade *versus* torque é ilustrada na figura 7.

Figura 7 – Curva rotação *versus* torque de um motor CC com excitação independente

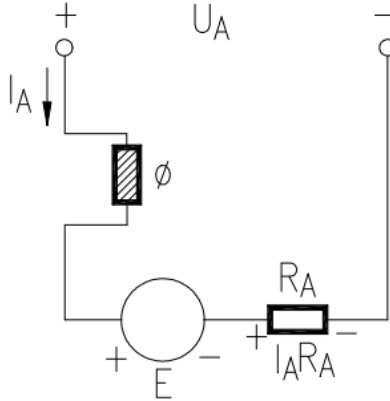


Fonte: (CHAPMAN, 2013)

2.1.2 Motor CC com excitação em série

Nesse esquema de ligação, o enrolamento de campo é conectado em série com o enrolamento de armadura, conforme mostra a figura 8:

Figura 8 – Ligação de um motor CC com excitação em série



Fonte: (WEG, 2007)

Como pode ser observado na figura 8, o enrolamento de campo e de armadura são percorridos pela mesma corrente. Isso significa que o fluxo Φ depende da corrente de armadura i_a , então, a equação 16 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$T = K'' i_a^2 \quad (36)$$

Ou, ainda:

$$T = K''' \Phi^2 \quad (37)$$

Aplicando a Lei de *Kirchhoff* a esse conjunto e desprezando-se a resistência do enrolamento de campo, chega-se à expressão representada pela equação 38.

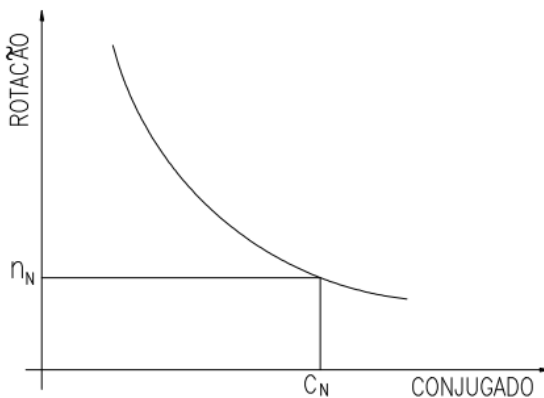
$$\omega_m = \frac{V}{K \sqrt{\frac{T}{K'''}}} - \frac{R_a T}{K^2 \frac{T}{K}} \quad (38)$$

Substituindo $\frac{K}{\sqrt{K'''}}$ por uma nova constante C , chega-se à:

$$\omega_m = \frac{V}{C \sqrt{T}} - \frac{R_a}{C^2} \quad (39)$$

A relação rotação *versus* torque dessa máquina é:

Figura 9 – Curva rotação *versus* torque de um motor CC série



Fonte: (WEG, 2007)

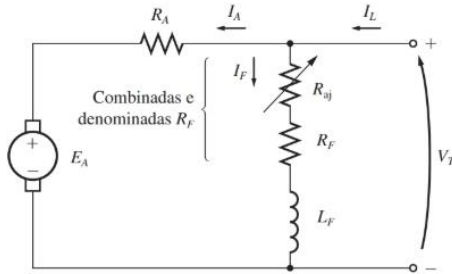
2.1.3 Motor CC com excitação em derivação

De acordo com Chapman (2013), um motor de corrente contínua em derivação tem o esquema de ligação representado na figura 10.

Aplicando-se a Lei de *Kirchhoff* nesse esquema de ligação, obtém-se:

$$V = E + R_a i_a \quad (40)$$

Figura 10 – Ligação de um motor CC com excitação em derivação



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Como $E = K\Phi\omega_m$, chega-se à seguinte expressão:

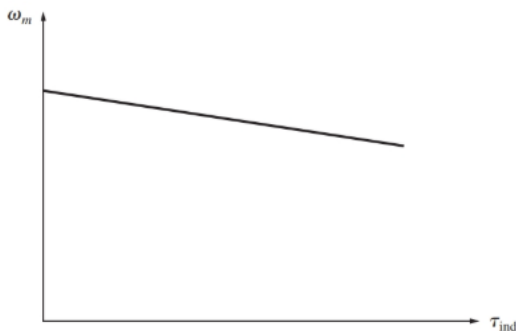
$$V = K\Phi\omega_m + R_a i_a \quad (41)$$

Sabendo que $T = K\Phi i_a$ e isolando a velocidade do motor, chega-se à:

$$\omega_m = \frac{V}{K\Phi} - \frac{R_a}{(K\Phi)^2} T \quad (42)$$

Segundo Chapman (2013), a equação 42 é simplesmente uma reta. A característica resultante de conjugado *versus* velocidade desse motor é mostrada na figura 11.

Figura 11 – Curva rotação *versus* torque de um motor CC em derivação



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

2.2 MÁQUINAS DE CORRENTE ALTERNADA

As máquinas de corrente alternada (CA) são geradores que convertem energia mecânica em energia elétrica CA e motores que convertem energia elétrica CA em energia mecânica (CHAPMAN, 2013, p.152).

Segundo Chapman, existem dois tipos de máquinas CA: as máquinas síncronas e as máquinas assíncronas (ou de indução).

A seguir serão explicados os princípios de funcionamento desses dois tipos de máquinas CA.

2.2.1 O campo girante

Para entender o princípio de funcionamento dos motores CA, primeiramente é necessário compreender como funciona o campo girante. Segundo Chapman (2013), se um campo magnético for produzido no estator da máquina e outro no rotor, então esses campos irão interagir de modo a criar um torque que faça o rotor girar. Se houvesse um modo de fazer o campo do estator girar, o campo magnético “acompanharia” o movimento do campo estatórico e, em consequência, faria o rotor do motor girar.

Uma forma de fazer esse campo do estator girar de maneira uniforme é utilizando o sistema trifásico. Se três bobinas, alimentadas com tensões alternadas defasadas 120° eletricamente, forem dispostas a 120° físicos, umas das outras, no estator, o campo magnético resultante da soma dos campos individuais de cada bobina irá rotacionar de maneira uniforme.

Conforme já explicado, as três correntes nas bobinas podem ser expressas, conforme Fitzgerald e Kingsley (2014), por:

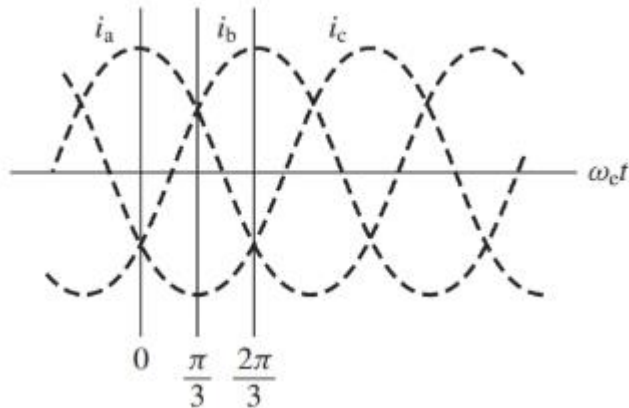
$$\begin{aligned} i_a &= I_{max} \cos(w_e t) \\ i_b &= I_{max} \cos(w_e t - 120^\circ) \\ i_c &= I_{max} \cos(w_e t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (43)$$

Onde:

- I_{max} é o valor de pico da corrente nas bobinas do estator.
- w_e é a frequência angular das correntes no estator.

Essas correntes estatóricas podem ser representadas em função do tempo, conforme mostra a figura 12.

Figura 12 – Correntes instantâneas em condições de equilíbrio trifásico

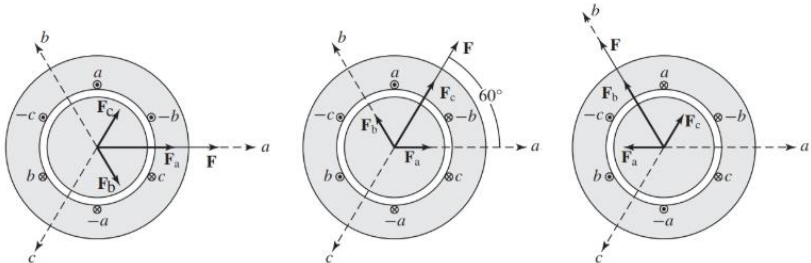


Fonte: (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014)

Para dar entendimento ao funcionamento do campo girante, suponha-se uma máquina trifásica com dois polos por fase, conforme mostra a figura 13.

Esta figura três instantes diferentes de um ciclo de rotação do campo, podendo-se ter uma ideia de como o campo girante se comporta.

Figura 13 – Campo girante resultante, em três instantes de tempo distintos



Fonte: (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014)

Para Pacheco (2009), a força magneto-motriz desse campo girante pode ser expressa por:

$$F(\theta, t) = F_{max} 1,5 \cos(\theta - \omega_s t) \quad (44)$$

onde

- F_{max} é o valor de pico da força magneto-motriz
- θ é o ângulo do vetor F
- w_s é a velocidade síncrona resultante no campo

A velocidade síncrona do campo resultante pode ser expressa em função do número de polos por fase da máquina e da frequência das correntes nas bobinas do estator (frequência da rede), conforme as equações a seguir:

$$\omega_s = \frac{2w_e}{p} \quad (45)$$

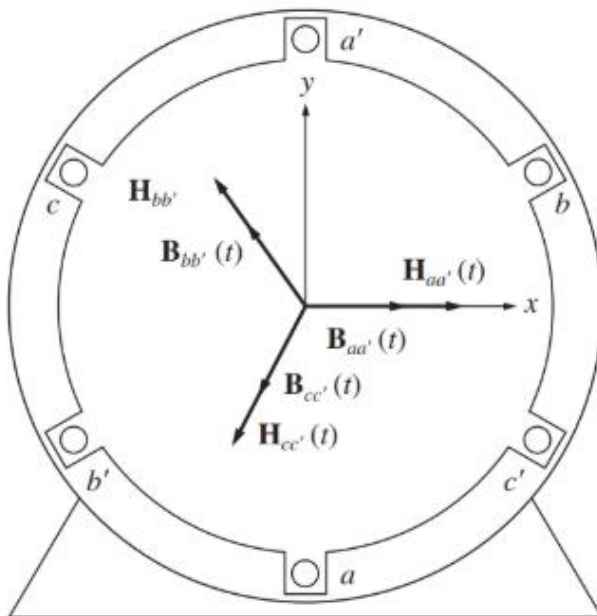
$$n_s = \frac{120f_e}{p} \quad (46)$$

2.2.2 Máquinas síncronas

Segundo Fitzgerald e Kingsley (2014), uma máquina síncrona é aquela na qual uma corrente alternada flui no enrolamento de armadura e fluxo contínuo de rotor é produzido através de uma excitação CC no enrolamento de campo ou por ímãs permanentes. Em máquinas com enrolamento de campo, o sistema mais utilizado para se fornecer esse fluxo é através de excitatrizes CA e retificadores, fornecendo assim uma tensão contínua para o enrolamento de campo. Rotores com ímãs permanentes não necessitam de potência para fornecer o fluxo, porém esse tipo é menos utilizado, por conta da incapacidade de ajuste de fluxo de acordo com as condições de operação da máquina.

No estator da máquina síncrona estão localizados os enrolamentos de armadura que, no caso do motor, são responsáveis por estabelecer o campo girante na máquina. A figura 14 mostra um exemplo de estator trifásico de dois polos. Pode-se observar também, nessa figura, cada pico do campo magnético induzido por cada espira.

Figura 14 – Estator de um motor síncrono trifásico



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Para se compreender sucintamente o funcionamento de um motor síncrono, observamos a figura 14, a qual mostra o estator de um motor trifásico. As três bobinas da armadura produzem um campo girante B_s no interior do motor, enquanto o enrolamento de campo produz um campo magnético contínuo B_r . O campo contínuo do enrolamento do rotor vai tender a se alinhar com o campo da armadura e, como esse último campo produzido pelas bobinas é girante, o campo do rotor vai acompanhar o movimento rotatório do campo do estator. Conforme se aumenta a carga aplicada ao rotor, aumenta-se a distância entre o campo magnético do rotor para o campo estatórico, ou seja, aumenta-se o ângulo que separa os vetores dos dois campos, denominado ângulo de carga. Apesar dessa distância entre os vetores, a velocidade de rotação do rotor permanece a mesma do campo das bobinas de armadura. Por conta disso, denomina-se esses dispositivos de máquinas síncronas, por girarem na velocidade síncrona, mesmo se aumentando o conjugado. Porém, segundo Fitzgerald e Kingsley (2014), esse ângulo não pode exceder 90° . Caso exceda, o campo magnético não terá mais torque o suficiente para acompanhar o campo da armadura, perdendo assim o sincronismo e interrompendo o

funcionamento correto da máquina. O torque máximo e potência nominal das máquinas síncronas são determinados pelos valores que assumem justamente quando o ângulo de carga vale 90° .

Segundo Pacheco (2009), o torque no rotor de um motor síncrono pode ser expresso por:

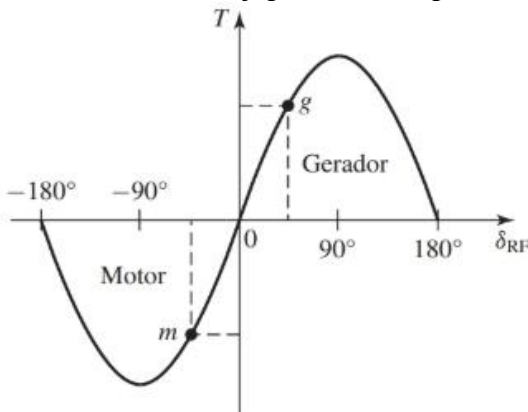
$$T = \frac{\pi}{2} \left(\frac{p}{2} \right)^2 \Phi_r FMM \sin(\delta) \quad (47)$$

onde:

- p é o número de polos do motor síncrono
- Φ_r é o fluxo resultante por polo no entreferro
- FMM é a força magneto-motriz do enrolamento CC de campo
- δ é o ângulo de carga

A característica de conjugado *versus* ângulo de carga é mostrado na figura 15, com FMM e Φ_r constantes:

Figura 15 – Característica conjugado *versus* ângulo de um motor síncrono



Fonte: (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014)

2.2.3 Máquinas assíncronas

Conforme Chapman (2013), as máquinas de indução são assim denominadas porque a tensão do rotor é induzida nos enrolamentos do

rotor, ao invés de ser fornecida por uma conexão física de fios. Ou seja, não é necessária uma corrente de campo CC para a máquina funcionar.

Os enrolamentos do estator são basicamente os mesmos de uma máquina síncrona. Entretanto, os enrolamentos do rotor são eletricamente curto-circuitados e muitas vezes não apresentam conexões externas (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014).

Segundo Chapman (2013), embora seja possível utilizar uma máquina de indução como gerador, ela é utilizada nessa função somente em situações especiais, pelo fato dessas máquinas possuírem desvantagens em relação à máquina síncrona quando utilizadas como gerador. Por conta disso, as máquinas de indução são usualmente referidas como motores de indução.

Para Pacheco (2010), o cilindro do rotor acolhe o enrolamento secundário e é constituído de aço laminado, no qual os condutores de cobre ou de alumínio são enrolados ou fundidos paralelamente ao eixo. Este enrolamento normalmente é curto-circuitado e pode basicamente de dois tipos:

- Rotor bobinado, enrolado, ou de anéis: é constituído por espiras de fios de cobre, alocados em ranhuras e ligadas em anéis coletores, que permitem um acesso externo ao rotor através de escovas. Por envolver escovas, possuem um custo maior de construção e manutenção, sendo utilizados quando se deseja obter maior torque de partida, controlar-se a velocidade do motor com maior precisão, introduzir-se resistências externas ao circuito do rotor ou se obter externamente as tensões do rotor.
- Rotor com bobinas maciças, rotor fundido ou tipo gaiola de esquilo: é constituído por barras de cobre, alumínio ou outras ligas condutoras, fundidas nas ranhuras do núcleo, possui suas extremidades curto-circuitadas. Essas barras geralmente não são exatamente paralelas ao eixo do rotor, possuindo algum pequeno ângulo em relação ao eixo, visando alcançar um torque mais uniforme e, em consequência, menos vibração no motor.

Na figura 16 pode-se observar um rotor bobinado. Observar os anéis coletores das bobinas do rotor. A figura 17 ilustra um corte que representa um rotor do tipo gaiola de esquilo.

Figura 16 – Rotor bobinado de um motor de indução



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Figura 17 – Corte de um motor de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo

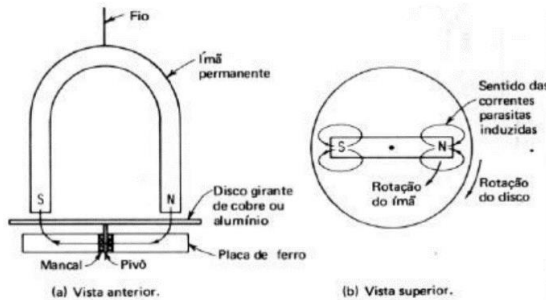


Fonte: (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014)

O princípio de funcionamento de um motor de indução tem como base o campo girante, explicado anteriormente. Pode-se observar que o campo girante resultante no entreferro da máquina tem o efeito análogo ao de um ímã permanente girando no centro do entreferro.

De acordo com Pacheco (2010) e observando-se a figura 18, com o movimento rotatório do ímã, suas linhas de fluxo cortam o condutor (disco). Conforme a Lei de Lenz, será induzida uma força eletromotriz sob cada polo do ímã. Com a tensão induzida, serão induzidas também correntes parasitas no disco e, em consequência, polos são induzidos no disco, conforme mostra a figura 18(b).

Figura 18 – Princípio de funcionamento do motor de indução



Fonte: (KOSOW, 1979)

Conforme Pacheco (2010) e observando-se o sentido das correntes parasitas induzidas no disco ilustrado na figura 18, pode-se concluir que, pela regra da mão direita, será induzido um polo sul atrás do polo norte do ímã (observando o sentido do movimento), gerando uma força de atração sobre o ímã, e um polo norte à frente deste mesmo polo, gerando uma força de repulsão. O mesmo ocorre para o polo sul do ímã, porém com polaridades invertidas. Com isso, o disco acompanha o movimento rotatório do ímã. Pode-se observar que, para existir uma força que induza o movimento no disco, é necessário um movimento relativo entre o ímã e o disco, ou seja, uma diferença de velocidade entre eles.

Esta diferença entre as duas velocidades é chamada velocidade de escorregamento ou rotação de escorregamento. Normalmente é expressa em porcentagem da velocidade do campo girante e pode ser expressa por (PACHECO, 2010, p. 9):

$$s = \frac{n_d}{n_s} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (48)$$

onde:

- n_d é a diferença de velocidade entre o ímã e o disco
- n_s é a velocidade do ímã, ou seja, a velocidade síncrona

- n é a velocidade do disco

Nos motores assíncronos o funcionamento se dá de forma análoga. O campo girante no estator gira na velocidade síncrona (n_s), induzindo correntes no rotor. As correntes induzidas no rotor produzem um campo que se opõe ao campo girante e, na interação desses dois campos, é produzido um torque que faz o rotor girar, sempre em uma velocidade menor em relação à do campo girante. Sendo, então, n a velocidade do rotor e n_s a velocidade do campo girante (velocidade síncrona), tem-se o escorregamento do motor de indução:

$$s = \frac{n_d}{n_s} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (49)$$

Com o escorregamento, pode-se definir a frequência da corrente induzida no rotor:

$$f_2 = s f_1 \quad (50)$$

onde f_1 é a frequência da corrente no estator.

Segundo WEG [20-?], qualquer máquina de indução com um escorregamento não nulo, ou seja, com a velocidade do rotor menor que a velocidade de rotação do campo girante, terá uma tensão induzida em seu rotor e ela pode ser definida em função do escorregamento. Pela teoria, para motor com rotor bloqueado, tem-se as seguintes expressões para a força contra eletromotriz induzida no estator e para a força eletromotriz induzida no rotor:

$$E_1 = 4,44 f_1 N_1 \Phi_m k_{e1} \quad (51)$$

$$E_2 = 4,44 f_2 N_2 \Phi_m k_{e2} \quad (52)$$

onde:

- E_1 é a força contra eletromotriz estatórica
- E_2 é força eletromotriz induzida no rotor
- k_{e1} e k_{e2} são os fatores de enrolamento do estator e do rotor, respectivamente
- Φ_m é o fluxo de magnetização
- f_1 é frequência do estator
- f_2 é a frequência elétrica do rotor

Conforme WEG [20-?], na presença de escorregamento, fazendo as alterações na equação 52, de acordo com a equação 50, tem-se:

$$E_{2s} = 4,44s f_1 N_2 \Phi_m k_{e2} \cong s E_2 \quad (53)$$

Esta equação pode ser simplificada, para um estudo mais sucinto da máquina:

$$\Phi_m \approx \frac{E_1}{f_1} \quad (54)$$

E, segundo a WEG [20-?], o conjugado induzido no rotor do motor assíncrono é definido como:

$$T = k \Phi_m I_{2s} \cos(\varphi)_{2s} \quad (55)$$

Essa equação pode ser reduzida, para um estudo mais apropriado da máquina:

$$T \approx \Phi_m I_{2s} \quad (56)$$

onde:

- k é a constante de conjugado para o número de polos, o enrolamento, as unidades empregadas, entre outros fatores
- $\cos(\varphi)_{2s}$ é o fator de potência do circuito do rotor
- I_{2s} é a corrente no rotor da máquina

A corrente no rotor pode ser definida em função da força eletromotriz induzida no rotor da máquina, tomando a seguinte forma:

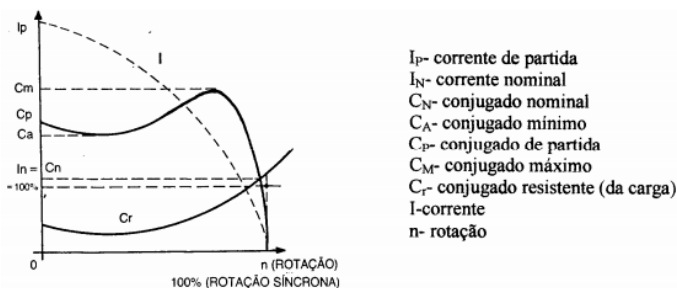
$$I_{2s} = \frac{s E_2}{Z_{2s}} \quad (57)$$

Analisando as equações anteriores, percebe-se que a corrente no rotor da máquina depende do escorregamento. Portanto, o torque induzido depende do escorregamento. Quanto menor o escorregamento (rotor com velocidade próxima da velocidade síncrona), menor será a corrente no rotor e, em consequência, menor será o conjugado do motor. Isso pode ser confirmado se observando que, com o motor operando a vazio, o torque necessário será pequeno, havendo apenas um pequeno

escorregamento, necessário para se induzir uma pequena corrente no rotor, induzindo o conjugado necessário para suprir as perdas por atrito, ventilação, entre outras fugas de potência mecânica.

A figura 19 mostra, entre outras curvas relevantes, a curva de conjugado *versus* velocidade de um motor de indução com rotor de gaiola de esquilo:

Figura 19 – Curvas para um motor assíncrono



Fonte: (WEG, [20-?])

3 CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES ELÉTRICOS

3.1 CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES CC

Tendo conhecimento do funcionamento do motor de corrente contínua, pode-se assim determinar as formas de controlar sua velocidade. A seguir serão explicadas as principais formas de se fazer o controle dos tipos de motores apresentados.

3.1.1 Motor CC com excitação independente

Pode-se observar, pela equação 35 e pela figura 7, que uma variação do torque não traria grandes consequências na rotação da máquina, pois, além do fato de a resistência de armadura R_a ser muitas vezes desprezível, o último fator da expressão é dividido por $(K\Phi)$ ao quadrado, reduzindo assim a influência do torque na velocidade do motor. Sendo assim, nesse esquema de ligação, a máquina possui uma boa regulação de velocidade.

O controle de velocidade do motor de corrente contínua com esse tipo de ligação pode ser feito de duas formas, segundo a WEG [20-?]: mantendo-se o fluxo constante e variando a tensão de armadura, ou mantendo a tensão de armadura constante e variando o fluxo magnético.

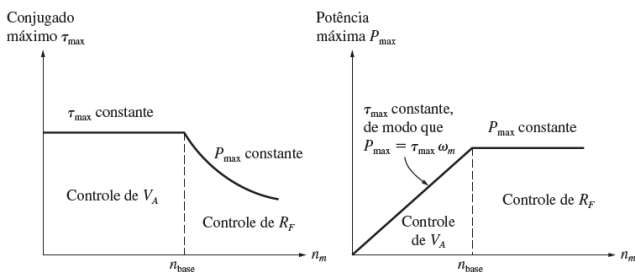
Segundo Chapman (2013), a relação entre o torque T , a potência P e a rotação ω_m pode ser expressa pela seguinte equação:

$$P = T\omega_m \quad (58)$$

No controle pela armadura, considerando i_a constante e como o fluxo é constante, conforme se aumenta a rotação, o torque também é constante e, conforme a equação 58, a potência aumenta linearmente com a velocidade. Já no controle pelo campo, para i_a constante, o conjugado diminui conforme se aumenta a rotação da máquina e a potência se mantém constante.

Sendo assim, a figura 20 ilustra a relação de torque e rotação e potência e rotação, de acordo com o tipo de controle de velocidade (por armadura ou pelo campo).

Figura 20 – Controle de velocidade do motor CC com excitação independente



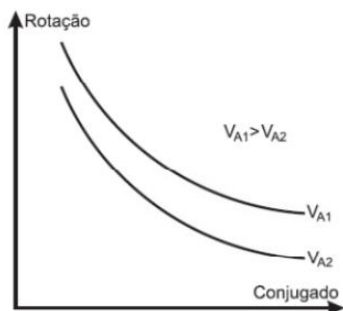
Fonte: (Chapman, 2013)

Como pode ser verificado pela figura 20, o controle pela armadura é indicado para cargas em que se necessita uma variação de velocidade com um torque constante. O controle pelo campo é utilizado quando se deseja uma variação de velocidade com potência constante, com consequente decaimento do torque com o aumento da rotação.

3.1.2 Motor CC com excitação em série

Nesse tipo de ligação, utiliza-se o controle de velocidade através da variação da tensão de alimentação do motor. Utilizando-se duas tensões V diferentes na equação 39, obtém-se duas curvas distintas, ilustradas na figura na figura 21.

Figura 21 – Controle de velocidade de um motor CC com excitação em série



Fonte: (ESCOLA POLITÉCNICA, [20-?])

Analisando a curva, caso se aumente a tensão de alimentação, a relação de torque e rotação é elevada para uma curva superior. Por exemplo, se o conjugado da carga for constante, independentemente da rotação, ao se elevar a tensão, a rotação aumenta até “chegar” na curva correspondente.

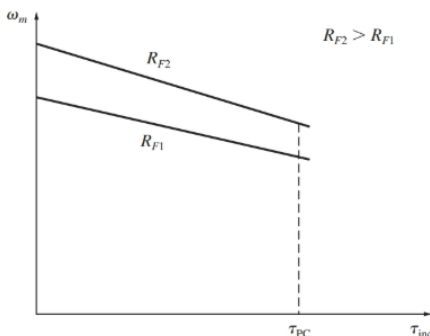
Como pode-se observar, o motor série pode operar com uma certa sobrecarga, havendo pouca variação da rotação e, em consequência, da corrente. Deve-se observar que, no caso de uma redução da carga, a velocidade do motor aumenta significativamente, ou seja, o motor com esse tipo de ligação não deve operar à vazio ou com carga muito reduzida, correndo o risco de disparar e sofrer danos em sua estrutura.

3.1.3 Motor CC com excitação em derivação

No motor CC em derivação tem-se algumas possibilidades de controle de velocidade, como, por exemplo, a variação da resistência de campo ou a alteração da tensão de armadura. A variação da resistência de campo, através de um reostato, é mais utilizada. Para alterar somente a tensão de armadura seria necessário um controlador de tensão variável. O controle por tensão de armadura é mais viável em motores de excitação independente.

No controle pela resistência de campo, ao aumentar o valor dessa resistência, o valor do fluxo é reduzido e, a partir da equação 42, observa-se que a relação de torque e velocidade também é alterada. Utilizando-se dois valores diferentes de resistência, se obtém duas curvas diferentes, ilustradas na figura 22.

Figura 22 – Controle de velocidade de um motor com excitação em derivação



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

3.2 CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES CA

Tendo um sucinto conhecimento sobre o funcionamento dos motores de corrente alternada, pode-se dar início ao estudo das formas de como variar a velocidade dessas máquinas. Pelo fato de sua natureza de funcionamento ser diferente da dos motores de corrente contínua, as suas formas de controle diferem. Aqui, será apresentado um novo dispositivo: o inversor de frequência. Entretanto, algumas formas se assemelham a alguns tipos de controle de velocidade dos motores de corrente contínua como por exemplo o controle de velocidade através da variação da resistência do rotor do motor de indução. A seguir serão apresentadas as principais formas de se controlar um motor de corrente alternada.

3.2.1 Motor de indução

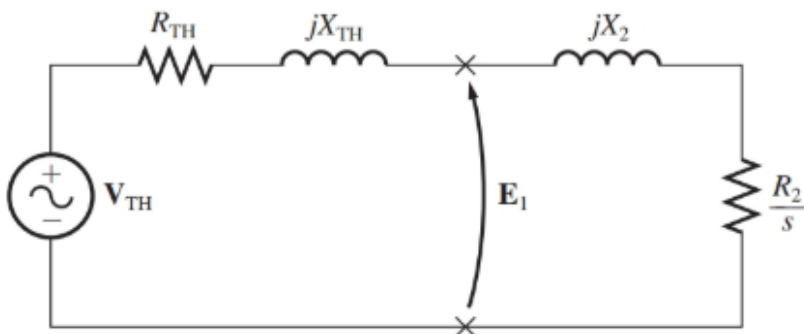
Segundo WEG [20-?], o motor de indução opera normalmente com uma velocidade constante, que varia ligeiramente conforme a carga aplicada ao seu eixo varia. Esse tipo de motor tem duas opções de rotor, sendo que o motor com rotor de gaiola de esquilo tem algumas vantagens em relação ao rotor bobinado como, por exemplo, a simplicidade, robustez e baixo custo de construção. Já o rotor bobinado é utilizado quando se deseja um acesso externo aos valores de tensão e corrente do rotor, ou mesmo uma alteração da resistência do valor da resistência do enrolamento do rotor, visando a variação da relação conjugado *versus* velocidade do motor. A seguir serão apresentadas algumas formas de variação de velocidade para um motor de indução trifásico.

3.2.1.1 Controle por variação da resistência rotórica

Uma das possibilidades de controlar a curva torque *versus* velocidade (escorregamento) de um motor de indução é através da variação da resistência do rotor. Como se torna necessário um acesso externo ao rotor, obrigatoriamente essa forma de controle é possível apenas em motores assíncronos com o rotor bobinado.

Segundo Chapman (2013), o circuito equivalente do motor de indução, simplificado pelo teorema de Thévenin, tem a forma ilustrada pela figura 23.

Figura 23 – Circuito equivalente do motor de indução



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

A equação que expressa conjugado produzido no rotor da máquina trifásica, é a seguinte:

$$T = \frac{3V_{TH}^2 \frac{R_2}{s}}{w_s [(R_{TH} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (59)$$

O conjugado máximo, para Chapman (2013), ocorre com o seguinte escorregamento:

$$s_{m\acute{a}x} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (60)$$

Substituindo-se a equação do escorregamento onde ocorre o máximo torque do motor de indução na equação 59, chega-se a equação de máximo torque da máquina:

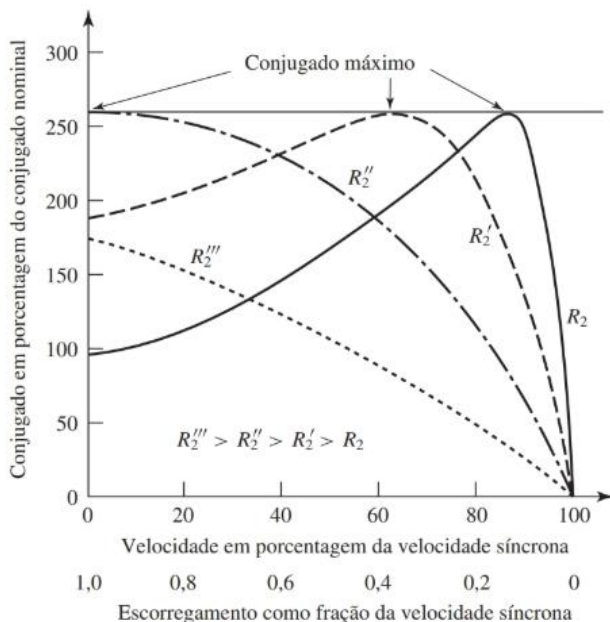
$$T = \frac{3V_{TH}^2}{2w_s [R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]} \quad (61)$$

Analisando a equação à cima, conclui-se que o máximo torque que a máquina pode alcançar é proporcional ao quadrado da tensão de

alimentação e também se relaciona de forma inversamente proporcional com as impedâncias do estator e do rotor. Ou seja, quanto menores forem as reatâncias de uma máquina, maior será o conjugado que ela poderá alcançar.

Utilizando a equação 60, que expressa o escorregamento onde ocorre o máximo torque da máquina, pode-se agora alterar a relação de conjugado *versus* rotação da máquina. Observa-se pela equação que se a impedância rotórica for aumentada, o escorregamento onde o conjugado máximo ocorre aumenta e, portanto, a rotação equivalente diminui. Então, para deslocar o ponto onde ocorre o máximo torque da máquina para uma rotação menor, mantido seu valor constante, aumenta-se a resistência do rotor. Este método é particularmente útil quando o motor é aplicado em cargas muito pesadas, onde é necessário um elevado torque na partida. Neste caso, aumenta-se o valor da resistência na partida e, com a carga já em rotação, diminui-se esse valor, para deslocar o torque máximo para próximo da velocidade da carga. Esta relação de torque e velocidade para diversos valores de resistência do rotor é mostrada na figura 24.

Figura 24 – Curvas conjugado *versus* velocidade para diversos valores de resistência rotórica



Fonte: (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014)

Outra possibilidade, segundo Fitzgerald e Kingsley (2014), é o uso de um motor de gaiola de esquilo com rotor de barras profundas ou gaiola dupla, cuja resistência diminui conforme a rotação aumenta, ou seja, ele tem uma partida com um torque relativamente bom, sem um desempenho pobre em altas rotações. Esse tipo de motor não possibilita um controle externo de variação de resistência, mas proporciona um desempenho satisfatório.

3.2.1.2 Controle por variação da frequência

Na década de 80, o desenvolvimento de semicondutores de potência com excelentes características de desempenho e confiabilidade possibilitou o desenvolvimento de dispositivos de variação de velocidade eletrônicos, sendo que o mais utilizado é o inversor de frequência. Esses equipamentos permitem uma variação de velocidade com uma maior economia de energia, melhor desempenho das máquinas CA, reduz a frequência de manutenção dos equipamentos, entre outras vantagens.

A velocidade síncrona do motor, ou seja, a velocidade do campo girante, depende diretamente da frequência do campo girante no estator, conforme foi explicado na seção 2.2.1. Variando-se a frequência de alimentação do motor, varia-se a frequência do campo girante e, em consequência, a velocidade síncrona. Então, o novo escorregamento do motor assíncrono será calculado em relação a essa nova velocidade.

Segundo a WEG [20-?], existem basicamente duas formas de funcionamento do inversor de frequência: o controle escalar e o controle vetorial.

3.2.1.2.1 Controle escalar

Conforme apresentado na seção 2.2.2, as equações que definem, de forma aproximada, o fluxo magnetizante e o torque em uma máquina assíncrona, são as seguintes:

$$\Phi_m \approx \frac{E_1}{f_1} \quad (62)$$

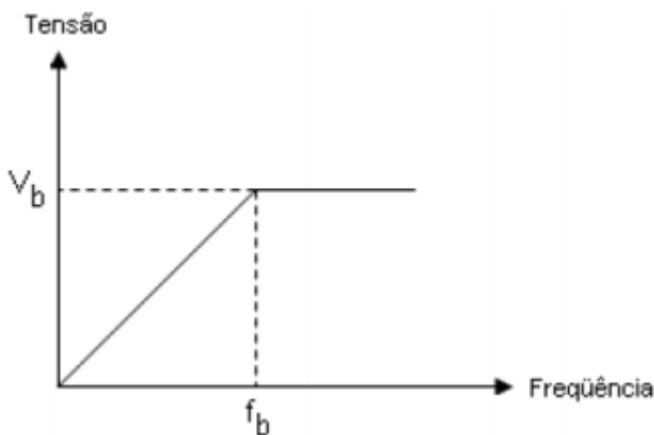
$$T \approx \Phi_m I_{2s} \quad (63)$$

Como pode se observar nas equações 62 e 63, o torque depende diretamente do fluxo magnetizante, e em consequência, ele é diretamente proporcional à tensão estatórica e inversamente proporcional à frequência aplicada.

Com isso, o inversor de frequência com controle escalar tem a estratégia de manter o torque, sendo ele nominal, constante, durante o controle de velocidade do motor, até a sua velocidade nominal. Para isso, ele fornece ao motor a relação “V/F” constante, ou seja, conforme a frequência fornecida ao motor aumenta, a tensão de alimentação cresce na mesma proporção. Para frequências acima de 30 Hz, a resistência do enrolamento do estator pode ser desprezada frente às reatâncias envolvidas.

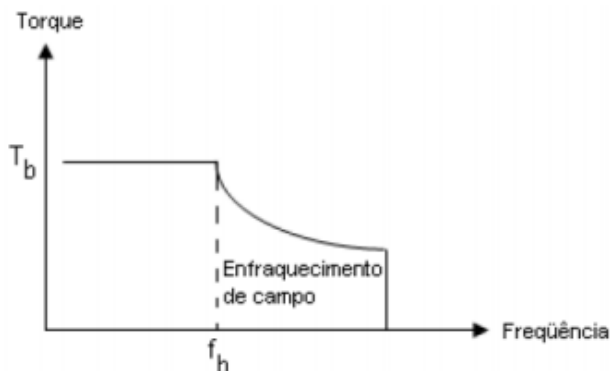
Até sua tensão e frequência nominais, essa relação “V/F” é alterada de forma constante, com torque constante. Após essa faixa de operação, a tensão é mantida constante e a frequência é aumentada além do seu valor nominal. Nessa região de operação, o fluxo vai sendo enfraquecido e, em consequência, o torque diminui conforme a frequência e a rotação aumentam. Esta faixa é denominada região de enfraquecimento de campo. Essa forma de operação está ilustrada nas figuras 25 e 26.

Figura 25 - Variação de tensão e frequência no controle escalar



Fonte: (WEG, [20-?])

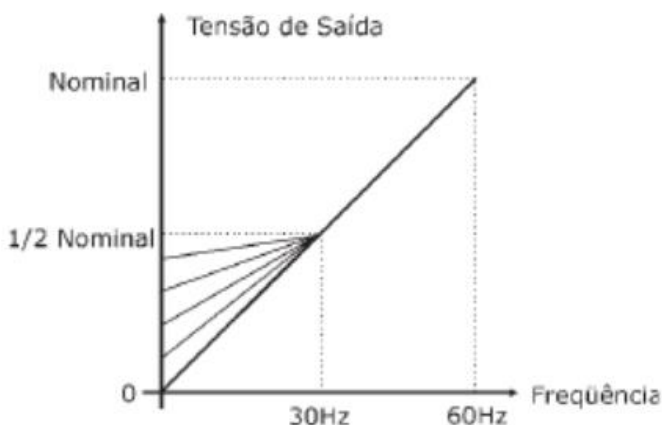
Figura 26 – Relação torque *versus* frequência no controle escalar



Fonte: (WEG, [20-?])

A resistência desprezada anteriormente, para frequências acima de 30 Hz, deve ser considerada para frequências mais baixas. Com essa resistência, a corrente no estator vai ser menor e, em consequência, o fluxo magnetizante e o torque vão ser menores. Para compensar essa perda de corrente, a tensão em baixas frequências deve ser maior, ou seja, alterando a relação “V/F” utilizada nas frequências maiores. O fornecimento de frequência e tensão para o motor de indução, em baixas frequências é ilustrado na figura 27.

Figura 27 – Controle escalar para baixas frequências



Fonte: (WEG, [20-?])

Pode-se concluir, então, que o uso do inversor de frequência com o controle escalar é utilizado em situações em que não é necessário um controle tão preciso de velocidade e torque. Segundo a WEG [20-?], a precisão do controle de velocidade do motor através desta técnica é de até 0,5 %, sem variações de carga, e de 3 a 5 %, com variações de 0 a 100 % no torque nominal.

3.2.1.2.2 Controle vetorial

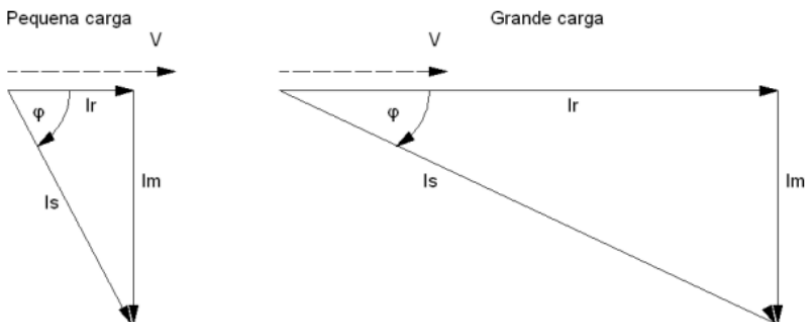
O controle vetorial é usado quando se deseja uma alta precisão na regulação da velocidade, operação mais suave em baixas frequências, alta performance dinâmica, entre outros fatores.

Segundo WEG [20-?], diferentemente do controle escalar, que mantém a relação “V/F” constante para variar a velocidade do motor, o controle vetorial altera essa relação de tensão e frequência em tempo real, de acordo com dados vindos do motor.

A corrente estatórica do motor de indução pode ser decomposta em duas componentes vetoriais:

- I_m ou corrente de magnetização, que é a corrente responsável por produzir o fluxo.
- I_r ou corrente produtora de torque.

Figura 28 - Correntes de magnetização e produtora de torque em um motor assíncrono



A corrente total do estator é a soma dessas duas componentes, e o produto vetorial entre essas duas correntes corresponde ao torque produzido pelo motor, a figura 28 mostra estas correntes para duas

condições de carga. Para se controlar e manter uma boa regulação de velocidade do motor, o inversor de frequência vetorial lê os dados dessas correntes e os processa através da equação característica de cada motor de indução, fazendo assim o controle necessário para uma alteração necessária nessas grandezas, devido a uma alteração de carga ou uma alteração de velocidade desejada. Para processar esses dados corretamente, o inversor precisa de informações como resistências do estator e do rotor, indutâncias do estator, do rotor e de magnetização e curva de saturação. Grande parte dos inversores vem com essas informações já pré-programadas para diferentes tipos de motores. Outros utilizam ensaios para determinar cada parâmetro de motores distintos.

Segundo WEG [20-?], o inversor de frequência vetorial tem duas possibilidades de operação: em malha aberta ou malha fechada.

Operando em malha fechada, o inversor de frequência utiliza um sensor de velocidade (*encoder*) para sua realimentação. Este tipo de operação é muito mais eficaz no controle do motor, pois controla a velocidade e torque com uma excelente regulação e resposta dinâmica. Ele apresenta, segundo WEG [20-?], uma regulação de velocidade de 0,01 %, uma regulação de torque de 5 %, faixa de variação de velocidade de 1:1000, torque de partida de 400 % do valor máximo. O inversor vetorial em malha fechada proporciona um ótimo desempenho em baixas rotações, se aproximando da eficácia do motor CC nesse quesito.

Operando em malha aberta (*sensorless*), o motor tem um desempenho inferior se comparado com a alimentação através de um inversor vetorial realimentado em baixas rotações, porém, seu desempenho é superior ao do controle escalar. Em rotações mais altas o seu desempenho se assemelha ao do inversor em malha fechada.

3.2.2 Motor síncrono

Como foi exposto na seção 2.2.2, os motores síncronos são máquinas de velocidade constante, a qual é determinada pela frequência das correntes do seu estator. Claramente, a solução mais fácil para o controle de velocidade do motor síncrono é o inversor de frequência.

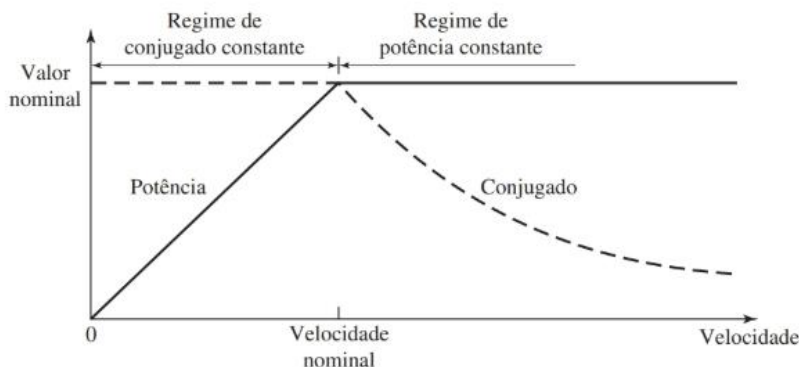
Para o motor de indução, foram apresentadas as formas de controle escalar e vetorial e, para o motor síncrono, as mesmas técnicas são utilizadas. Porém, para controle de velocidade em regime permanente, nesse caso não necessitaria uma forma tão precisa, pois a velocidade de rotação do motor depende simplesmente da frequência aplicada ao estator, sem que haja escorregamento (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014).

Segundo Pacheco (2009), o motor síncrono não tem conjugado de partida, portanto, são necessárias algumas técnicas para dar a partida no motor. Uma delas é a utilização de um enrolamento de amortecimento no rotor da máquina, semelhante a um rotor de gaiola de esquilo. Nesse caso, o motor partiria com o funcionamento de um motor de indução e, quando o rotor alcançasse uma velocidade próxima da síncrona, o motor entraria em sincronismo.

Outra técnica é a utilização de um inversor de frequência com a relação “V/F” constante até a velocidade síncrona, com conjugado constante. Após a velocidade síncrona, mantém-se a tensão constante e eleva-se a frequência. Assim, o motor irá aumentar sua velocidade, porém o torque é reduzido conforme a máquina é acelerada. Ou seja, nessa técnica, o motor funciona de forma semelhante ao motor de indução, porém sem escorregamento. Porém, para o rotor conseguir “acompanhar” o aumento de frequência, essa transição tem que ser feita de forma suave ou até mesmo com o auxílio de um enrolamento de amortecimento.

A figura 29 ilustra a curva de conjugado *versus* velocidade deste tipo de motor.

Figura 29 – Controle de velocidade de um motor síncrono com um inversor “V/F”.



Fonte: (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014)

Segundo Fitzgerald e Kingsley (2014), em regime permanente pode-se variar a velocidade da máquina síncrona, variando-se a frequência. É indicado variar a velocidade mantendo-se a relação “V/F” constante, para a máquina operar em fluxo constante e, em consequência, com conjugado constante. Para a máquina não sair de sincronismo

durante a mudança de frequência (que deve ser feita de forma suave), utiliza-se o enrolamento amortecedor em conjunto com o inversor de frequência. Como em regime a máquina estaria à uma determinada frequência, ao alterar-se essa frequência, iria surgir uma diferença de velocidade entre o campo girante e o rotor, e, conseqüentemente, um torque induzido no enrolamento amortecedor (seção 2.2.3) que irá “puxar” o rotor para próximo da nova velocidade síncrona, onde a máquina retornará ao sincronismo em nova velocidade.

Na maioria das situações, e também pela limitada utilização dos motores síncronos, o controle escalar apresentado acima é suficiente para se ter um desempenho satisfatório nessas máquinas. Para se ter um controle de torque em conjunto, utiliza-se o controle vetorial.

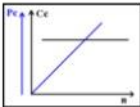
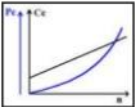
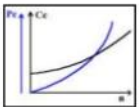
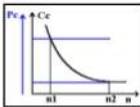
4 SELEÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS

Para a seleção do motor elétrico que será usado em determinadas situações, vários fatores devem ser levados em conta, tais como: forma de alimentação do motor, o tipo de carga, precisão necessária no controle da máquina, rendimento, confiabilidade do motor, entre outros.

Antes da evolução da eletrônica de potência, o motor CC dominava o segmento em que era necessário um controle preciso de velocidade. Porém, com o avanço dos inversores de frequência, e também pelo alto custo da máquina CC, os motores assíncronos foram ganhando espaço no mercado.

O primeiro fator que deve ser levado em conta na seleção do motor é o tipo de carga que essa máquina vai alimentar. Variados tipos de carga se comportam de forma diferente conforme a velocidade é variada, por isso, a análise da característica conjugado *versus* velocidade é de extrema importância para a seleção do motor. Na figura 30 pode-se ver alguns tipos de curva de torque de variados tipos de cargas.

Figura 30 – Tipos de cargas

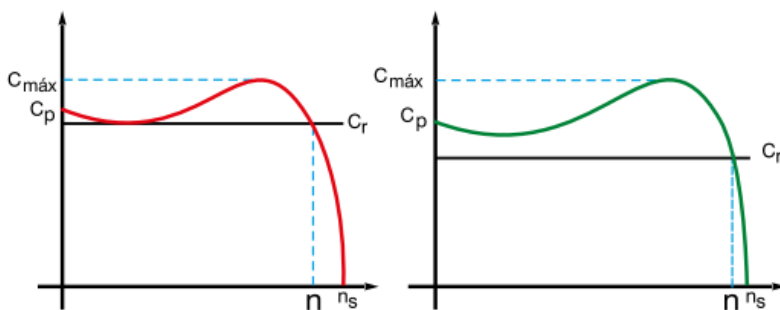
Curva:	CONSTANTE	LINEAR	PARABÓLICO	HIPERBÓLICO
Conjugado X Rotação				
Exemplos de Aplicação	<ul style="list-style-type: none">• Compressores à pistão• Talhas• Bombas à pistão• Britadores• Transportadores contínuos	<ul style="list-style-type: none">• Calandras• Bombas de vácuo	<ul style="list-style-type: none">• Bombas cent.• Ventiladores• Misturadores cent.• Compressor cent.	<ul style="list-style-type: none">• Bobinadeira de fios, panos e papel;• Descascador de toras;• Tornos.

Fonte: (WEG, [20-?])

Independentemente do motor selecionado para alimentar a carga, a curva de torque *versus* velocidade do motor terá que estar sempre acima da mesma curva da carga. A figura 31 mostra duas seleções de um motor de indução para uma carga linear, sendo a imagem da esquerda uma seleção equivocada, pois o torque da carga pode superar o conjugado fornecido pelo motor e, dessa forma, impediria que o motor acelerasse para próximo da velocidade síncrona, e a decisão correta na seleção do motor, mais à direita.

Nesse exemplo, a partida seria possível, como visto anteriormente, com uma resistência variável do rotor, com alta resistência na partida e, conforme a rotação aumentasse, a resistência poderia ser zerada.

Figura 31 – Seleções de um motor síncrono para uma carga constante



Fonte: (WEG, [20-?])

4.1 CARGAS HIPERBÓLICAS

São cargas em que a relação de torque e velocidade tem forma hiperbólica, ou seja, um alto torque na partida, reduzindo o conjugado enquanto a rotação aumenta. Como exemplos desses tipos de carga, tem-se bobinadeiras, descascadores de toras e tornos de faceamento. De acordo com o que foi apresentado nas seções anteriores, o motor que mais se adequa à curva de uma carga hiperbólica é o motor CC série, podendo-se confirmar isso observando a figura 8. É importante, no funcionamento desse motor, que ele inicie o movimento com carga aplicada ao seu eixo, pois, como foi visto anteriormente, um baixo conjugado em baixas rotações teria como consequência uma baixa corrente de campo, podendo a máquina disparar.

Em bobinadeiras de papel, por exemplo, em que a carga é sensível a variações bruscas de torque, onde, no caso de um “tranco” na bobinadeiras, o papel poderia se romper e impedir a operação, o funcionamento do motor série é adequado, pois, no caso de um aumento repentino no torque da carga, o motor instantaneamente reduziria a velocidade, amortecendo o impacto sobre o papel. No caso do emprego de um motor CC de excitação em derivação, por exemplo, no caso de uma alta no torque, de acordo com a figura 11, poderia causar danos à carga.

O motor série poderia ser empregado também, analisando apenas a relação de torque e velocidade, em um carro elétrico, onde, na arrancada

do automóvel, é necessário um alto torque para a aceleração e, em velocidade de regime, apenas o conjugado para manter a rotação.

4.2 CARGAS CONSTANTES

Em cargas constantes, que são o tipo mais comum de carga, o estudo de caso não se limita simplesmente pela característica de torque da carga e sim, também, pela necessidade de controle de torque e velocidade.

Em elevadores de cargas, onde o torque de partida é alto e a rotação de operação é baixa, a solução mais adequada seria um motor CC. Em situações onde a elevadora exige uma velocidade mais constante para cargas em que pesos diferentes são aplicados, por exemplo, os motores com excitação independente ou derivação poderiam ser empregados, pois, conforme as figuras 7 e 11, esses tipos de motor tem uma boa regulação de velocidade. Em cargas onde a regulação da rotação não é tão importante, o motor série poderia ser empregado. O mesmo se aplica para outros tipos de cargas com torque contínuo, como plainas e correias transportadoras.

Em cargas onde não se exige um controle de torque e velocidade, como bombas e compressores, o motor de indução sem controle de frequência é indicado. Nessa situação, prevalece a robustez e baixo custo dos motores assíncronos.

Em pontes rolantes, onde é preciso um controle de velocidade, porém sem controle de torque, poderia ser empregado um motor de indução com inversor de frequência no modo escalar ou vetorial em malha aberta, dependendo, neste caso, do nível de precisão aplicado. Um inversor de frequência vetorial em malha fechada seria desnecessário, pois só é aplicado quando é necessário um controle de torque.

4.3 CARGAS LINEARES

Esse tipo de carga, em que o torque cresce linearmente com a rotação, é a mais incomum dentre as apresentadas. No caso de bombas a vácuo, por exemplo, em que não é necessário controle de velocidade nem de torque, o motor de indução é o mais indicado, por seu baixo custo e confiabilidade.

4.4 CARGAS PARABÓLICAS

Nessa categoria, tem-se equipamentos muito utilizados, como ventiladores e bombas centrífugas.

Em ventiladores, por exemplo, que em regime não está sujeito a grandes variações de torque, um motor de indução é bem adequado. Para controlar a velocidade desse equipamento, uma solução simples seria a adição de resistências sobre o rotor. Pode-se traçar a curva de torque de um ventilador sobre a curva da figura 24, a qual mostra quatro curvas para quatro valores de resistência de rotor diferentes. Analisando as curvas, nota-se que a curva de torque do ventilador cortaria as quatro curvas em pontos de velocidade diferentes. Uma solução, então, seria a possibilidade de adicionar três resistências ao rotor. Operando sem nenhum resistor, o rotor giraria em sua velocidade nominal e, conforme surge a necessidade de se reduzir a velocidade, os resistores, um a um, vão sendo adicionados ao rotor.

5 CONCLUSÃO

Foram verificadas, nesse trabalho, algumas das diversas opções de motores elétricos e as respectivas formas de se fazer o controle de velocidade dessas máquinas. A importância da escolha do motor para diferentes tipos de carga ficou bem evidente, de modo que a seleção possa proporcionar um melhor funcionamento.

Em relação às máquinas de corrente contínua, conclui-se que, apesar de serem consideradas ultrapassadas por muitos, ainda têm uma grande empregabilidade quando se necessita de altos torques em baixas rotações, o que não seria viável com motores de corrente alternada. Elas podem ser empregadas, também, em situações com controle fino de torque e velocidade.

As máquinas assíncronas, de acordo com o que foi apresentado, têm uma enorme aplicabilidade em diversas situações, sendo a máquina mais utilizada na indústria atualmente. Ela pode ser utilizada desde situações onde não é necessária precisão, até situações onde é preciso um razoável controle, possibilitado pela atuação de inversores de frequência, sendo que o nível de precisão ainda pode ser escolhido de acordo com o tipo do inversor, nas suas formas de controle vetorial e escalar.

Já os motores síncronos têm um controle exato de velocidade. Eles são aplicáveis em uma região de operação em que o motor de indução é utilizado, que é uma faixa de média rotação, já que, em altas rotações, o motor de indução tem desempenho semelhante a uma máquina síncrona. É utilizado quando se precisa um altíssimo rendimento, controle de fator de potência, entre outros fatores. Ele é aplicável, também, em baixas rotações, já que é o motor que mais se assemelha com uma máquina de corrente contínua, com a mesma justificativa anterior, ou seja, ele é utilizado onde é necessário um alto rendimento, velocidade totalmente constante, entre outros fatores.

Não se limitando apenas aos motores apresentados neste trabalho, existem outras opções de motores e controle, que poderão ser abordados em futuras pesquisas.

Como sugestões para futuros trabalhos pode-se considerar outros tipos de máquinas elétricas, como as usadas em veículos automotores, elétricos ou não, máquinas elétricas usadas para geração de energia elétrica e máquinas elétricas usadas em dispositivos de controle de processos.

REFERÊNCIAS

- [1] CHAPMAN, Stephen J. (Ed.). **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda., 2013.
- [2] ESCOLA POLITÉCNICA. Universidade de São Paulo (Org.). **Motor de Corrente Contínua**. São Paulo, [20-?]. Disponível em:
<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1230461/mod_resource/content/1/MCC_Resumo.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2019.
- [3] FITZGERALD, A. E.; KINSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. (Ed.). **Máquinas Elétricas**: de Fitzgerald e Kinsley. 7. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda., 2014.
- [4] KOSOW, Irving L.. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 4. ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1982.
- [5] PACHECO, Renato Lucas. **Conversão Eletromecânica de Energia A**. 2009. ed. Florianópolis: [s.n.], 2009.
- [6] PACHECO, Renato Lucas. **Conversão Eletromecânica de Energia B**. 2010. ed. Florianópolis: [s.n.], 2010.
- [7] WEG (Org.). **Características e Especificações de Motores De Corrente Contínua e Conversores CA/CC**. Jaraguá do Sul, 2007.
- [8] WEG (Org.). **Guia de Especificação de Motores Elétricos**. Jaraguá do Sul, [20-?].
- [9] WEG (Org.). **Motores de Indução Alimentados por Inversores De Frequência PWM**. Jaraguá do Sul, [20-?].
- [10] WEG (Org.). **Motores Elétricos Assíncronos de Alta Tensão**. Jaraguá do Sul, [20-?].
- [11] WEG (Org.). **Guia de Aplicação: Inversores de Frequência**. 2. ed. Jaraguá do Sul, [20-?].